

Perancangan PLTA *Pico-Hydro* menggunakan Tabung *Hydrocyclone* dan Turbin Kaplan melalui Solusi Numerik Runge-Kutta

Indah Permatasari*¹ dan Abdul Hakim Prima Yuniarto²

¹Institut Teknologi Telkom Purwokerto, Jl.D.I.Panjaitan No.128, Purwokerto 53147

²Institut Teknologi dan Sains Nahdlatul Ulama (ITS NU) Pekalongan, Jl. Karangdowo No.9, Pekalongan 51173

Intisari

Perancangan PLTA *Pico-Hydro* menggunakan turbin Kaplan dilakukan dengan memanfaatkan aliran air berbentuk tabung *Hydrocyclone*. Turbin Kaplan dapat bergerak dengan kecepatan putaran mengikuti kecepatan rotasi fluida sehingga dapat dianalisis sistem gerak konvertnya. Perumusan persamaan gerak yang diperoleh melalui penerapan persamaan *Euler-Lagrange* untuk menghasilkan persamaan diferensial. Persamaan tersebut diterapkan dengan metode Runge-Kutta yang merupakan salah satu metode pendekatan iterasi dengan solusi numerik. Sistem konverter gerak initerdiri dari 5 rodadengan rodake-1 seporos dengan roda ke-2. Roda ke-2 dan ke-3 terhubung secara serantai dan roda ke-4 saling terhubung dengan roda ke-5 untuk menghasilkan pembangkit listrik. Hasil yang diperoleh aliran air dapat memutarakan turbin kaplan dengan gaya sebesar 50 N. Kecepatan putaran sudut maksimum sebesar 5500 rad/s pada roda ke-5. Kecepatan putaran roda-roda pada sistem konverter akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya waktu.

Abstract

Designing of the *Pico-hydrowater* Power Plan which uses Kaplan turbine applies water flow within *Hydrocyclone* tube. Kaplan turbines can move with angular velocity following fluid velocity analyzing the movement converter system. Equation of movement formulated by applying Euler-Lagrange, therefore, generating a differential equation. The differential equation iterated by the Runge-Kutta Method which is one of the numerical solutions. The movement converter system consists of 5 wheels with 1st wheel spindle with 2nd wheel. The 2nd and 3rd wheels are interconnected and the 4th wheel is connected to the 5th wheel to generate electricity generation. The results obtained by the flow of water can rotate Kaplan turbines with a force of 50N. Maximum angular velocity of 5500 rad/s on the 5th wheel. The rotation speed of the wheels on the converter system will increase with time.

Keywords: angular velocity; hydrocyclone; Kaplan turbine; pico-hydro.

*Corresponding author: indah@ittelkom-pwt.ac.id

<http://dx.doi.org/10.12962/j24604682.v16i1.5782>
2460-4682 ©Departemen Fisika, FSains-ITS

I. PENDAHULUAN

Ketersediaan pasokan listrik di pedesaan merupakan salah satu kebutuhan yang sangat penting guna menunjang kualitas hidup masyarakat. Permasalahan bagi daerah di pedesaan yang belum mendapatkan pelayanan listrik dari PLN (Perusahaan Listrik Negara), biasanya diatasi dengan Pembuatan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) skala kecil atau PLTA *Pico-Hydro*. PLTA *Pico-Hydro* merupakan salah satu sistem untuk mengkonversi energi dari air menjadi energi listrik yang bisa diperbarui [1]. Persyaratan yang harus dipenuhi dalam pengembangan sistem ini adalah ketersediaan aliran air bertekanan tinggi dalam bentuk aliran sungai atau air terjun skala kecil dengan kecepatan arus yang memadai [2]. Jika kondisi ini tidak terpenuhi, maka hal ini akan menjadi masalah tersendiri bagi wilayah di pedesaan yang tidak mempunyai

sumber aliran yang memadai. Untuk itu, dibuat sebuah inovasi untuk mengatasi persoalan ini melalui perancangan dan realisasi PLTA *Pico-Hydro* yang mampu bekerja dalam kondisi kecepatan aliran air yang tidak memadai.

Inovasi ini dikembangkan dengan memanfaatkan aliran air dalam bak penampungan berbentuk tabung *hydrocyclone* dengan bagian bawahnya berbentuk kerucut. Bagian bawah bak tersebut dibuat sebuah lubang untuk mengalirkan air dari bagian atas ke bagian bawah. Berdasarkan prinsip mekanika fluida jika sebuah sistem mendapatkan tekanan dari atas, maka gerakan fluida atau air tersebut akan mengalir dan membentuk gerak rotasional jika bagian bawah lebih sempit dari bagian atas [3]. Efek rotasional ini dapat dimanfaatkan untuk memutar turbin Kaplan. Turbin Kaplan merupakan salah satu jenis turbin yang bentuknya sangat populer seperti baling-baling pesawat dan kapal laut [4]. Turbin Kaplan dapat bergerak

dengan kecepatan putaran mengikuti kecepatan rotasi fluida yang dalam hal ini adalah aliran rotasional air pada bagian bawah bak penampungan.

Perumusan persamaan gerak diperoleh melalui persamaan *Euler-Lagrange* untuk menganalisis putaran konverter pada turbin Kaplan. Penerapan persamaan *Euler-Lagrange* telah berhasil diterapkan untuk menganalisis putaran roda pada sepeda sebagai representasi gerak giroskop [5]. Perumusan persamaan gerak yang diperoleh melalui penerapan persamaan *Euler-Lagrange* dalam bentuk persamaan diferensial. Permasalahan yang terdapat dalam persamaan diferensial tidak dapat diselesaikan secara analitik sehingga membutuhkan penyelesaian secara numerik [6]. Untuk mengetahui beberapa besaran fisis yang terkait dengan sistem yang akan ditinjau, maka pada penelitian ini dilakukan penentuan solusi numerik persamaan gerak sistem konverter dengan metode *Runge-Kutta*. Metode *Runge Kutta* adalah metode penyelesaian masalah nilai awal persamaan differensial dengan pendekatan iterasi numerik sehingga dilakukan dengan pemrograman computer [7].

Perhitungan algoritma dengan metode *Runge-Kutta* dari fungsi Lagrange terdiri atas inersia dan jari-jari roda akan dilakukan untuk menghitung kecepatan putaran roda dan ukuran roda-roda yang menghubungkan antara turbin dan generator. Tujuan penelitian ini untuk menentukan ukuran jari-jari pada roda sehingga dapat menghasilkan sistem konverter yang ideal dan penentuan parameter gaya dan momen inersia pada turbin Kaplan.

II. METODOLOGI

Tahapan pertama pada penelitian ini adalah penentuan dimensi dan ukuran tabung *hydrocyclone* dan turbin Kaplan melalui percobaan beberapa ukuran tabung dan turbin yang mampu menghasilkan gerak rotasional untuk memutar poros turbin dengan kecepatan sudut (ω). Bentuk turbin dimodifikasi dari bentuk dasarnya agar diperoleh putaran yang optimal. Parameter yang terkait dengan dimensi tabung dan turbin adalah: tinggi tabung (H), tinggi kerucut (h), diameter tabung (D), jari-jari turbin (r) dan sudut pada sisi-sisi kerucut (θ). Berikut merupakan desain tabung *hydrocyclone* dan turbin kaplan seperti ditunjukkan Gambar 1.

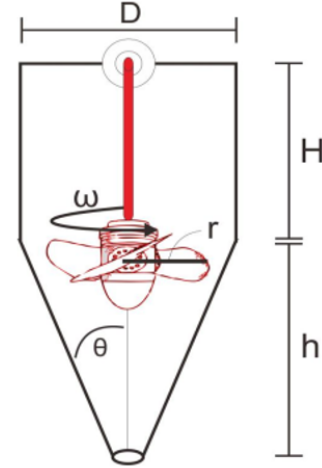
Tahapan ini melakukan penentuan dimensi ukuran tabung *hydrocyclone* dengan menggunakan persamaan matematis turbin air jenis Kaplan sebagai berikut:

$$Q = k\sqrt{2gh}\frac{\pi}{4}D^2 \quad (1)$$

Pada turbin kaplan ini sudut sudu pengarah sebesar 30° karena

dapat menghasilkan putaran yang maksimal. Nilai debit air yang dihasilkan agar air dapat bergerak rotasional maka tinggi kerucut (H) = 15 cm, tinggi tabung (h) = 19,5 cm dan diameter tabung (D) = 19 cm.

Langkah selanjutnya penyelesaian perumusan persamaan gerak PLTA *Pico-Hydro* adalah dengan mencari torsi pada titik pusat massa roda 1. Titik pusat massa roda 1 terletak pada sumbu putarnya sehingga jarak titik pusat massa roda



Gambar 1: Skema tabung *hydrocyclone* dan turbin Kaplan.

pertama adalah jari-jarinya. Torsi pada roda 1 yang dikenai gaya F tegak lurus dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\tau = Fr_1 \sin 90 \quad (2)$$

Pers.(2) adalah gaya eksternal berupa torsi pada titik pusat massa, yaitu gaya yang melawan gerakan sistem konverter untuk berputar, serta gaya gesekan yang bergantung pada frekuensi angular turbin yang terkopel serta bergantung pada suatu konstanta b atau koefisien gesekan kinetis $\theta_1 b$ termasuk gaya eksternalnya juga. Maka Q_n dalam persamaan *Euler-Lagrange* dapat dirumuskan sebagai berikut:

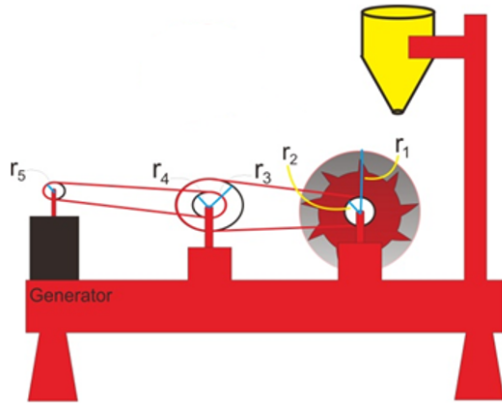
$$Q_n = FR_1 - \dot{\theta}_1 \quad (3)$$

Sistem konverter ini hanya berputar pada poros yang tetap, maka energi potensialnya dianggap tidak ada $V = 0$. Komponen PLTA *Picohydro* yang terdiri atas 5 roda dengan energi kinetik rotasi yang dirumuskan sebagai berikut:

$$T = \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}^2 \quad (4)$$

Maka perumusan fungsi Lagrange yang tersusun dari $V = 0$ dan T adalah sebagai berikut:

$$L = \frac{\dot{\theta}_1^2}{2} \left[I_1 + I_2 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 + I_3 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 + I_4 \left(\frac{r_1 r_3}{r_2 r_4} \right)^2 + I_5 \left(\frac{r_1 r_3}{r_2 r_4} \right)^2 \right] \quad (5)$$



Gambar 2: Sistem Konverter yang dirancang.

Kecepatan putaran setiap roda dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (6)$$

$$\dot{\theta}_4 = \dot{\theta}_5 = \dot{\theta}_1 \left(\frac{r_1 r_3}{r_2 r_4} \right) \quad (7)$$

Maka persamaan gerak konverter energi PLTA *Picohydro* dapat dinyatakan dengan dalam perumusan sederhana, yaitu:

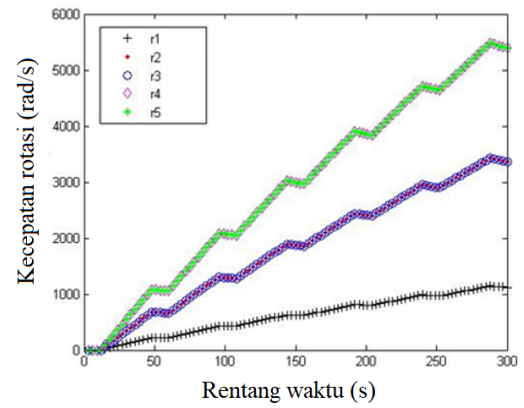
$$\frac{d^2 \dot{\theta}_1}{dt^2} = \frac{Fr_1 - \dot{\theta}_1 b}{I} \quad (8)$$

Setelah mendapatkan perumusan matematis dari persamaan gerak maka langkah selanjutnya melakukan simulasi dengan program Matlab dengan metode *Runge-Kutta*. Hasil tersebut kemudian akan diimplementasikan dalam pembuatan *proto-type*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Persamaan gerak sistem PLTA *Pico-Hydro* diselesaikan dengan menggunakan metode *Runge-Kutta* orde-4. Diasumsikan bahwa dorongan air yang keluar dari ujung tabung *hydrocyclone* dinyatakan dalam bentuk *F* merupakan gaya eksternal. Gaya tersebut bernilai konstan pada rentang waktu cukup lama kemudian bernilai nol pada rentang waktu yang sedikit. Algoritma diperoleh dengan metode *Runge-Kutta* untuk menentukan solusi numerik persamaan gerak konverter energi PLTA *Pico-Hydro*.

Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga air *picohydro* dapat menghasilkan listrik dari aliran air, ketika aliran air memutar turbin, maka roda-roda berputar dengan generator dan dapat menghasilkan listrik. Sistem roda terdiri atas roda seporos dan serantai yang keduanya akan saling terhubung dan digunakan untuk menghasilkan pembangkit yang memiliki kecepatan anguler optimal. Roda pertama seporos dengan roda ke-2. Roda ke-2 dengan roda ke-3 terhubung secara serantai. Selanjutnya, roda ke-3 dan 4 dihubungkan dengan sis-



Gambar 3: Grafik karakteristik putaran roda yang ideal setelah mendapatkan gaya sebesar 50 N.

tem roda yang seporos. Roda ke-4 dengan 5 dihubungkan serantai, dan roda 5 dihubungkan dengan generator. Gambar 2 menunjukkan desain sistem konverter yang dirancang.

Metode *Runge Kutta* diselesaikan dengan komputasi karena dapat menyederhanakan persoalan matematis untuk menyelesaikan persamaan diferensial yang didapatkan seperti pada Pers.(8). Adapun untuk memperoleh parameter jari-jari roda dan momen inersia melalui metode *Runge Kutta* orde 4 ini dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$y(i+1) = y_i + \frac{1}{6}k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4 \quad (9)$$

Hasil perhitungan menunjukkan jari-jari roda $r_1 = 0,9$ m, $r_2 = 0,3$ m, $r_3 = 0,8$ m, $r_4 = 0,5$ m, $r_5 = 0,2$ m. Nilai jari-jari roda tersebut mampu memutar turbin ketika dikenai gaya sebesar 50 N. Sumbu putar roda mampu menggerakkan roda melalui titik pusat roda. Dimana momen inersia pada titik pusat roda diperoleh dari $I = m.r^2$ dimana massa roda berbeda-beda. Semakin besar nilai momen inersianya maka jarak pusat roda semakin besar. Inersia masing-masing roda secara berturut-turut adalah $0,5 \text{ kgm}^2$, $0,02 \text{ kgm}^2$, $0,245 \text{ kgm}^2$, $0,18 \text{ kgm}^2$ dan $0,05 \text{ kgm}^2$. Berdasarkan parameter tersebut maka diperoleh hasil perhitungan numerik yang menunjukkan karakteristik kecepatan putaran roda-roda dalam satuan radian/second seperti ditunjukkan Gambar 3.

Berdasarkan grafik karakteristik dalam Gambar 3 diperoleh kecepatan putaran roda-roda terhadap waktu pada sistem konverter energi *Pico-Hydro*. Iterasi dilakukan sebanyak 100 sehingga diperoleh nilai eror yang kecil sebesar 0,08. Roda pertama dengan kecepatan 1000 rad/s terkena dorongan air langsung keluar dari tabung *hydrocyclone*. Roda 2 dan 3 yang terhubung serantai memiliki kecepatan sudut optimalnya 3600 rad/s kemudian roda 4 dan 5 terhubung satu dengan lainnya memiliki kecepatan yang besar dibandingkan dengan roda yang lain yaitu 5500 rad/s. Berdasarkan hasil tersebut sistem konverter ini dapat berkerja dengan baik ditunjukkan dengan semula bergerak lambat mampu mempercepat putaran roda 5 yang terhubung dengan genetor listrik. Gaya yang didapatkan sebesar 50 N untuk putaran roda-roda yang terhubung oleh turbin kaplan. Hasil ini berbeda dengan hasil penelitian yang



Gambar 4: Prototype PLTA *Pico-hydro*.

dilakukan oleh Rudi (2018) menunjukkan gaya untuk poros turbin kaplan sebesar 53,9 N [8]. Semakin besar kecepatan sudut putaran roda-roda seiring dengan bertambahnya waktu.

Hasil tersebut kemudian diimplementasikan ke dalam pembuatan prototype yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Realisasi PLTA dengan pembuatan prototype skala Pico-hydro kemudian dilakukan pengujian dengan menggunakan lampu 3 Watt. Pada saat tabung hydrocyclone dialiri air maka aliran air tersebut akan menggerakkan turbin kaplan yang terintegrasi ke dalam roda-roda yang saling bergerak satu sama lain sehingga dapat menghasilkan listrik pada lampu dengan daya sebesar 3 Watt.

IV. SIMPULAN

Putaran roda-roda berdasarkan metode Runge-Kutta diperoleh nilai jari-jari roda 1, 2, 3, 4, dan 5 masing-masing 0,9 m, 0,3 m, 0,8 m, 0,5 m, dan 0,2 m. Gaya yang didapatkan sebesar 50N dengan kecepatan sudut maksimum sebesar 5500 rad/s untuk putaran roda 5 yang terhubung ke generator.

-
- [1] E. Suryono, "Simulasi Turbin Crossflow Dengan Jumlah Sudu 18 Sebagai Pembangkit Listrik Picohydro", *SIMETRIS*, vol. 8, no. 2, pp. 547-552, November 2017.
 - [2] K. Alexander and E. Giddens, "Optimum Penstocks For Low Head Microhydro Schemes", *Renewable Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 507-519, March 2008.
 - [3] S. Klara, "Mechanic Fluid Dynamic", Makasar: LKPP, 2011.
 - [4] J.B. Sinaga, "Perancangan Turbin Air Untuk Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Studi Kasus Desa Way Gison Kecamatan Sekincau Kabupaten Lampung Barat)", *Jurnal Sains dan Inovasi*, vol. 16, no. 2, pp. 1-12, 2009.
 - [5] J. Meijaard, "Linearized Dynamics Equations For The Balance And Steer Of A Bicycle: A Benchmark And Review", in *Proceedings of The Royal Society Of London A: Mathematical Physical and Engineering Science*, 2007.
 - [6] Z.M. Mayasari, Y. Fauzi and C.R.P. Jelita, "Kajian Solusi Numerik Metode Runge Kutta Nystrom Orde Empat Dalam Menyelesaikan Persamaan Differensial Linier Homogen Orde Dua", *Gradien*, vol. 12, no. 2, pp. 1165-1170, April 2016.
 - [7] H. Wijayanti, S. Setyaningsih and M. Wati, "Metode Runge Kutta Dalam Penyelesaian Model Radang Akut", *Ekologia*, vol. 11, no. 2, pp. 46-52, Oktober 2011.
 - [8] R. Saputra and T. Liichan, "Perancangan Ulang Turbin Kaplan Poros Vertikal di PLTM Plumbungan", *Bina Teknik*, vol. 14, no. 2, pp. 153-161, Desember 2018.